

Eetu Jääskeläinen

# GEOTERMISEN ENERGIAN HYÖDYNTÄ- MINEN LÄMPÖPUMPUILLA KAUKO- LÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta

Kandidaatintyö

Lokakuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Eetu Jääskeläinen: Geotermisten lämpöpumppujen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä  
Geothermal heat pumps in district heating systems

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Energiatekniikka

Elokuu 2020

---

Suomella on tavoitteena pienentää lämmöntuotannon hiilidioksidipäästöjä. Geotermiset lämpöpumput ovat mahdollinen keino pienentää näitä päästöjä kaukolämmön tuotannossa. Geotermiset lämpöpumput ovat laitteita, jotka siirtävät matalalämpöistä geotermistä energiaa korkealämpöisempään kaukolämpöverkkoon työn avulla. Tässä työssä selvitettiin kuinka geotermiset lämpöpumput soveltuvat kaukolämmön tuotantoon sekä millaisia etuja ja haasteita niillä on verrattuna perinteisiin kaukolämmön tuotantomenetelmiin. Lisäksi selvitettiin geotermisten lämpöpumppujen taloudellista kannattavuutta ja niistä aiheutuvia ympäristövaikutuksia.

Työssä tutustuttiin kaukolämmön sekä geotermisen energian peruseräkkeisiin. Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmöntuotantomuoto, ja se tuotetaan pääasiassa puupolttoaineilla ja fossiilisilla polttoaineilla. Kirjallisuutta geotermisen energian hyödyntämisestä löytyy runsaasti. Tutkimuksessa selvisi, että ihmisen hyödynnettävissä olevaa geotermistä energiaa on saatavilla kaikkialla Euroopassa. Suomen kallioperän takia kaukolämmön tuotantoon vaadittaviin lämpötiloihin pääsemiseksi täytyy porata erittäin syväälle. Toisaalta Suomen vakaa kallioperä pienentää riskejä kaivon romahtamisesta porauksen aikana sekä suurempien järjestysten syntyisestä hydraulisen stimuloinnin aikana. Otaniemeen on rakenteilla Suomen ensimmäinen geoterminen kaukolämpölaitos, joka tuottaa toivottavasti lisää tietoa geotermisen energian hyödyntämisestä Suomen olosuhteissa.

Työssä perehdyttiin myös kompressio- ja absorptiolämpöpumppujen toimintaperiaatteisiin ja siihen, kuinka ne soveltuvat kaukolämmön tuottamiseen. Yleisesti lämpöpumppujen ongelmana kaukolämmön tuotannossa on ollut kaukolämpöveden korkea lämpötila. Perinteisesti kompressiolämpöpumpuilla on pystytty tuottamaan maksimissaan 90 °C:n lämpötiloja kaukolämpöveden ollessa talvisin jopa yli 120 °C. Viime vuosina markkinoille on tullut lämpöpumppuja, jotka pääsevät tarpeeksi korkeisiin lämpötiloihin. Työssä perehdyttiin tällaisten korkealämpöpumppujen erityispiirteisiin ja niiden käyttämiin kylmäaineisiin.

Tutkimuksista käy ilmi, että geotermiset lämpöpumput ovat monissa tilanteissa kilpailukykyisiä verrattuna fossiilisiin lämmöntuotantomuotoihin. Geotermisiä lämpöpumppuja käyttämällä primäärienergiankulutus pienenee ja pumput lisäävät uusiutuvaa energiaa kaukolämpöverkkoon. Lisäksi geotermiset lämpöpumput pienentävät kaukolämmön tuotannon hiilidioksidipäästöjä merkittävästi, jos sähköntuotantorakenne on vähäpäästöinen. Pumpuilla voidaan myös optimoida ja tuoda joustavuutta kaukolämpöjärjestelmään sekä tasapainottaa sähköverkkoa. Geotermisten lämpöpumppujen merkittävimpana heikkoutena voidaan pitää niiden investointikustannusten suuruutta, mutta useissa tutkimuksissa pumput olivat alhaisten käyttökustannusten ansiosta perinteisiä kaukolämmön tuotantomuotoja taloudellisesti kannattavampia.

Kirjallisuus geotermisistä lämpöpumpuista keskittyy erityisesti alueille, joilla geoterminen potentiaali on suurta. Tutkittujen kaukolämpöverkkojen lämpötila tai rakenne saattaa erota Suomen vastaavista merkittävästi. Näistä syistä tutkimustietoa on vaikea soveltaa

Suomen olosuhteisiin. Geotermisiä lämpöpumppuja ei ole Suomessa käytössä kaukolämmön tuotannossa ja niistä tarvitaankin lisää tutkimustietoa Suomen olosuhteissa.

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	KAUKOLÄMPÖ.....	3
3.	GEOTERMINEN KAUKOLÄMPÖ.....	5
3.1	Geoterminen energia.....	5
3.2	Nykytila.....	5
3.3	Tulevaisuuden näkymät.....	7
3.4	Geotermisen energian hyödyntäminen Suomessa.....	8
3.4.1	Tehostettu geoterminen järjestelmä EGS.....	8
3.4.2	Geotermisten kaivojen poraus.....	9
4.	LÄMPÖPUMPUT .....	11
4.1	Kompressiolämpöpumput .....	11
4.2	Absorptiolämpöpumput.....	13
4.3.	Korkealämpöpumput .....	15
4.4	Kylmäaineet.....	15
5.	GEOTERMISEN ENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN LÄMPÖPUMPUILLA.....	19
5.1	Edut.....	19
5.2	Haasteet.....	21
5.3	Geotermisten lämpöpumppujen kannattavuus .....	22
5.4	Ympäristövaikutukset.....	23
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	26
	LÄHTEET .....	28

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

CHP	Combined heat and power, Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto
EGS	Enhanced geothermal system, Tehostettu geoterminen järjestelmä
COP	Coefficient of performance, Lämpökerroin
HCAHP	Hybrid compression absorption heat pump, Hybridikompressio-absorptiolämpöpumppu
GWP	Global Warming Potential, Kylmäaineen ilmaston lämmittämistä kuvaava kerroin
CFC	Freonit eli kloorifluorihiilivety yhdisteet
HCFC	Osittain halogenoidut kloorifluorihiilivedyt
HFC	Fluorihiilivetyt
PJ	Petajoule, $1 \text{ PJ} = 10^{15} \text{ J}$

# 1. JOHDANTO

Suomen hallitusohjelmaan on kirjattu tavoitteeksi hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä, ja että sähkön ja lämmön tuotannon tulee olla lähes päästötöntä 2030-luvun loppuun mennessä. Hallitusohjelmaan on kirjattu mahdollisia keinoja näihin tavoitteisiin pääsemiseen, näitä ovat muun muassa sähkön verotuksen alentaminen kaukolämpöverkkoon lämpöä tuottaville lämpöpumpuille ja konesaleille sekä polttoon perustumattomien uusien kaukolämmön tuotantotapojen käyttöönoton ja pilotoinnin edistäminen. (Valtioneuvosto, 2019)

Tämän työn tavoitteena on selvittää, kuinka geotermistä energiaa ja geoenergiaa voidaan hyödyntää lämpöpumpuilla. Geoterminen energia on ehtymätöntä ja uusiutuvaa maan sisällä olevaa lämpöenergiaa, joka on syntynyt syvällä maan sisässä. Geoenergialla tarkoitetaan maansisäistä energiaa, jonka on lämmittänyt aurinko. (Huusko, 2016) Usein saatavilla oleva geoterminen energia on lämpötilaltaan matalampaa kuin kaukolämpövesi (Dumas & Ruggero, 2017). Lämpöpuput mahdollistavat matalalämpöistenkin geotermisten varantojen hyödyntämisen kaukolämmityksessä. Ne siirtävät faasimuutosten avulla lämpöenergiaa matalammasta lämpötilasta korkeampaan (Grassi, 2018). Geotermiset lämpöpumput ovat geotermisellä energialla toimivia lämpöpumppuja.

Geotermiset lämpöpumput ovat mahdollinen teknologia, jolla ensimmäisessä kappaleessa esitettyihin hallitusohjelman tavoitteisiin voidaan päästä. Tässä työssä esitellään, kuinka lämpöpumpuilla voidaan hyödyntää geotermistä energiaa. Lisäksi pohditaan, millaisia etuja ja haasteita geotermisillä lämpöpumpuilla on verrattuna muihin kaukolämmön tuotantomenetelmiin ja voivatko geotermiset lämpöpumput olla taloudellisesti kannattavia. Työssä keskitytään Euroopan ja erityisesti Suomen olosuhteisiin. Työ toteutetaan kirjallisuusselvityksenä.

Aluksi käydään läpi aiheeseen liittyvää taustatietoa. Luvussa 2 kerrotaan peruseriaatteen kaukolämmöstä ja kaukojäähdytyksestä, joita molempia voidaan tuottaa geotermisillä lämpöpumpuilla. Luvussa 3 käsitellään geotermistä energiaa ja siinä kerrotaan tarkemmin geotermisen energian nykytilasta, geotermisistä varannoista, tulevaisuudennäkymistä ja geotermisen energian hyödyntämisestä Suomen olosuhteissa. Luvussa 4 taas paneudutaan lämpöpumpputekniikkaan, siihen kuinka se mahdollistaa geotermisen energian hyödyntämisen kaukolämmön tuotannossa ja kuinka lämpöpumpputekniikka

on kehittymässä. Luvussa 5 käsitellään itse geotermisiä lämpöpumppuja kaukolämmön tuotannossa, niiden etuja, haasteita ja riskejä teknistaloudellisesta näkökulmasta. Lisäksi luvussa käsitellään geotermisistä lämpöpumpuista aiheutuvia ympäristövaikutuksia. Luvussa 6 kootaan lopuksi yhteen työn johtopäätökset.

## 2. KAUKOLÄMPÖ

Kaukolämpö on yleisin tapa lämmittää Suomessa, ja sen käyttö on yleistä myös muualla Pohjois- ja Itä-Euroopassa. Kaukolämpö tuotetaan keskitetysti useimmiten lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksilla tai erillisillä lämpölaitoksilla. Suomen kaukolämmön tuotannossa yleisimpiä polttoaineita ovat puupolttoaineet: näillä tuotettiin 33 %, kivihiilellä 20 % ja turpeella 15 % vuonna 2018 kaikesta kaukolämmöstä. Kaukolämmöstä selvästi alle puolet tuotettiin fossiilisilla polttoaineilla. (Tilastokeskus, 2019)

Lämmön tuotantolaitoksilta lämpö siirretään asiakkaille veden tai vesihöyryn avulla käyttämällä erillisiä meno- ja paluuputkia. Lämmin kaukolämpövesi kuljetetaan asiakkaalle menoputkea pitkin. Asiakkaan lämmönvaihdin erottaa meno- ja paluuputket ja siirtää lämmön kaukolämpövedestä asiakkaan lämmöntarpeisiin, kuten patteriverkostoon ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen. Jäähdytynyt kaukolämpövesi palaa tuotantolaitokselle paluuputkea pitkin. Kaukolämpövesi ei siis kierrä asiakkaan patteriverkostossa, vaan kaukolämpöverkosto on suljettu. Kaukolämpöveden lämpötila vaihtelee ulkolämpötilan mukaan siten, että kylminä pakkaspäivinä veden täytyy olla lämpimämpää. Kaukolämpöveden menolämpötila on yleisesti 65–115 °C ja paluulämpötila 40–60 °C. Keski-Euroopassa käytetään myös alle 90 °C:een ja jopa 180 °C:een lämpötiloja. (Koskelainen, et al., 2006)

Kaukolämpövesi käsitellään korroosion minimoimiseksi ja värjätään mahdollisten vuotojen paljastamiseksi. Kaukolämpöverkot ovat yleensä silmukoituja, joten jos verkkoa joudutaan korjaamaan jostakin, saadaan lämpö asiakkaalle toista kautta. Kaukolämpö onkin suosittua kilpailukykyisen hintansa lisäksi myös korkean toimitusvarmuutensa vuoksi. (Koskelainen, et al., 2006)

Kaukolämmön tuotantolaitosten, ja erityisesti kaukolämpöverkoston, investointikustannukset ovat merkittäviä. Kaukolämpö soveltuukin parhaiten tiheään asutuille alueille, kuten kaupunkeihin ja taajamiin. Näillä alueilla lämpöteho maapinta-alaa kohden on suuri, joten myös lämpöteho johtopituutta ja lämmöntuotantolaitosta kohden on suuri. Suuri lämpöteho maapinta-alaa kohden tarkoittaa täten pienempää investointia suhteessa myytyyn lämpöön. (Koskelainen, et al., 2006)

Kaukojäähdytyksellä tarkoitetaan keskitettyä jäähdytetyn veden jakelua asiakkaille jakeluverkoston avulla. Kaukojäähdytys toimii siis samaan tapaan kuin kaukolämmitys, mutta lämmitetyn veden sijaan jakeluverkostossa kulkee jäähdytettyä vettä. Kaukojäähdytyksen kysyntä ja tarve ovat kasvaneet viime vuosina. Jäähdytystä tarvitsevat erityisesti



hotellit, toimistorakennukset ja julkiset rakennukset. Viime vuosina myös asuinrakennuksia on rakennettu kaukokylmän piiriin. Kaukokylmää voidaan hyödyntää myös esimerkiksi elintarviketeollisuudessa. Joissain kohteissa voi esiintyä kaukolämmön ja -jäähdytyksen tarvetta samanaikaisesti. (Koskelainen, et al., 2006)

Kaukokylmäverkosto on hyvin saman kaltainen kuin kaukolämpöverkosto. Kaukokylmäveden lämpötila on yleensä 7–10 °C ja vesi lämpenee kohteessa noin 5–9 °C. Pienen meno- ja paluulämpötilojen eron takia vesimäärän täytyy olla suurempi kuin kaukolämpöverkostossa. Toisaalta verkoston paineen kaukokylmäverkostossa ei tarvitse olla yhtä suuri kuin kaukolämpöverkostossa, sillä kaukokylmäveden matalilla lämpötiloilla höyrystymisen vaaraa ei ole. Kaukokylmävesi käsitellään samaan tapaan kuin kaukolämpövesi. (Koskelainen, et al., 2006)

## 3. GEOTERMINEN KAUKOLÄMPÖ

### 3.1 Geoterminen energia

Geotermisellä energialla tarkoitetaan maan sisäistä lämpöenergiaa. Geoterminen lämpö on lähtöisin maan ytimeistä, noin 6000 km syvyydeltä, jossa lämpötila on noin 4000 °C. Maan ytimeistä lämpö siirtyy maankuoreen sulan kiviaineksen eli magman virtauksina ja johtumalla. Geoterminen energia on jäännösenergiaa maapallon syntymästä sekä maan sisuksissa tapahtuvien radioaktiivisten hajoamisten synnyttämää lämpöenergiaa. Tarkasti ei tiedetä, kuinka suuri osa geotermisestä energiasta on peräisin maapallon syntymästä ja kuinka suuri osa radioaktiivisista hajoamisista. Kumpaakin on arveltu olevan lähes yhtä paljon. (Bertani, et al., 2009) (Huusko, 2016)

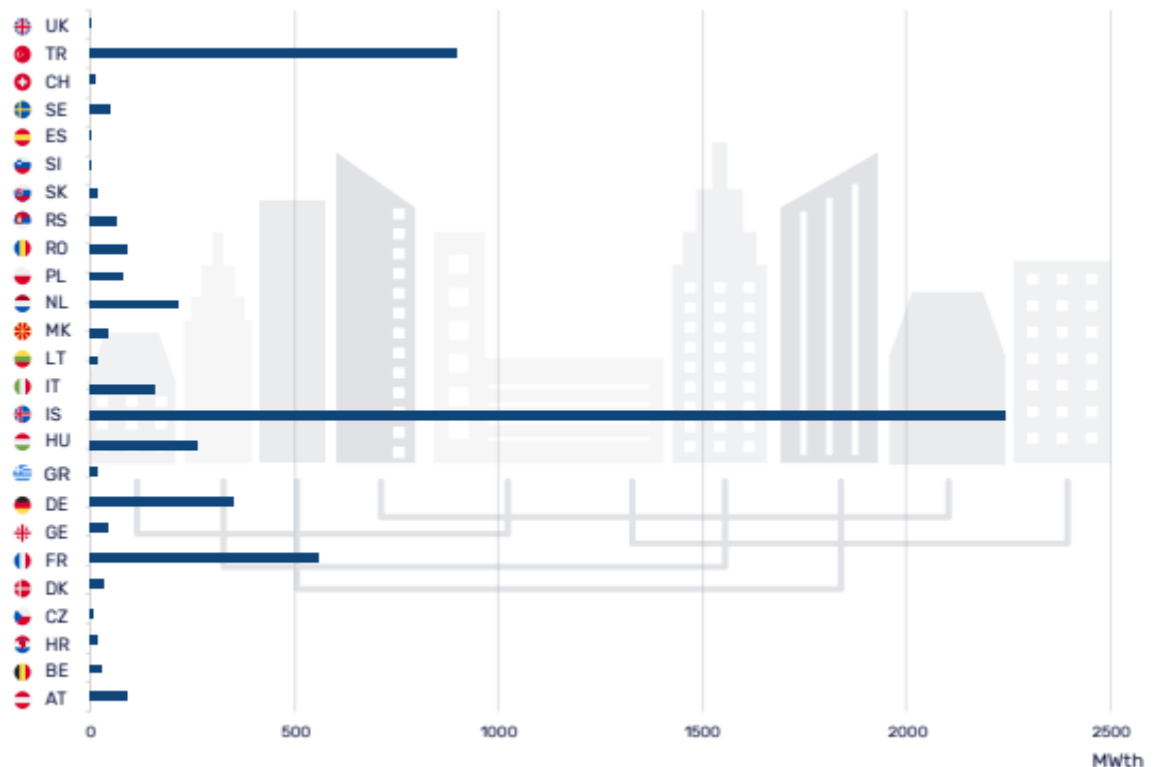
Usein geotermiseen energiaan ajatellaan kuuluvan myös maankuoren aivan ulompien osien lämpöenergia, jota kutsutaan geoenergiaksi eli maalämmöksi. Geoenergia on vain pieniltä osin geotermistä energiaa ja pääosin auringon säteilyn lämpöenergiaa. Geoenergiaa pystytään hyödyntämään lämmityksessä esimerkiksi maalämpöpumpuilla. Geotermisen energian vaikutukset alkavat näkyä eri alueilla eri syvyydellä, Suomessa vasta noin 500 metrin syvyydessä. Tätä lähempänä maanpintaa saatavilla oleva energia on geoenergiaa. (Huusko, 2016) Geoenergiaa voidaan hyödyntää kaukolämmön tuotantoon, ja sen hyödyntäminen lämpöpumpuilla ei poikkea geotermisen energian hyödyntämisestä juurikaan. Englanninkielisessä kirjallisuudessa näiden kahden välille ei usein tehdä eroa.

Geotermistä energiaa on kokonaisuudessaan  $12,6 \cdot 10^{15}$  PJ. Tästä energiasta maan kuoreen päätyy  $5,4 \cdot 10^{12}$  PJ. Todellisuudessa vain murto-osa tästä on ihmisen hyödynnettävissä. (Bertani, et al., 2009)

### 3.2 Nykytila

Geotermisellä kaukolämmöllä on pitkät perinteet. Lambertin mukaan ensimmäinen kaukolämpöjärjestelmä rakennettiin Chaudes-Aiguesin kylässä jo 1300-luvulla. Tämä maailman ensimmäinen kaukolämpöjärjestelmä hyödynsi kuumen lähteen geotermistä energiaa käyttämällä lähteen kuumaa vettä kaukolämpövetenä. (Lambert, 2015) Nykyään geotermistä energiaa voidaan hyödyntää kaukolämmityksessä kehittyneen poraus- ja lämpöpumpputekniikoiden ansiosta, vaikka kuumia lähteitä ei olisi saatavilla (Dumas & Ruggero, 2017).

Kuvasta 1 nähdään, että vaikka geotermistä kaukolämpöä käytetään lähes jokaisessa Euroopan maassa, edelleen parhaita alueita geotermisen kaukolämmön hyödyntämiseen ovat tuliperäiset alueet, kuten Islanti, Turkki ja Ranska. Esimerkiksi Islannissa 90 % rakennuksista lämpiää geotermisellä energialla (NEA, 2013).



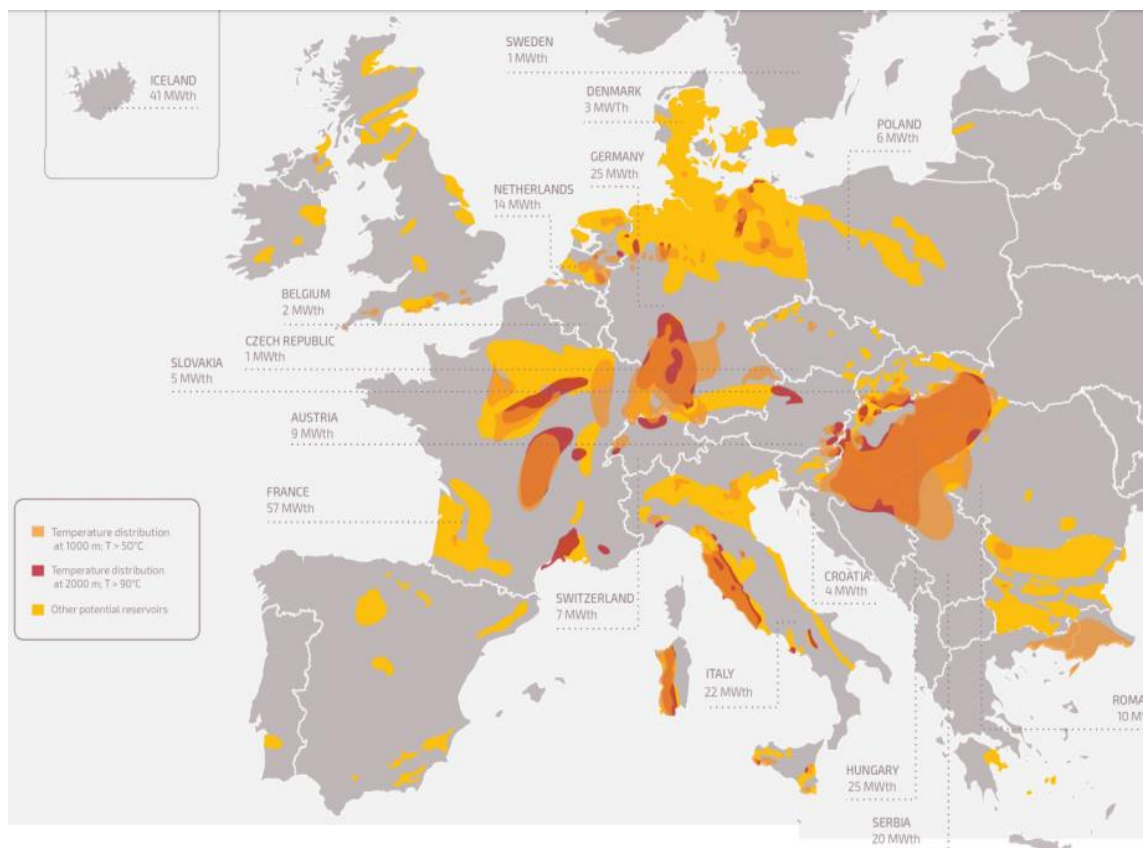
**Kuva 1 Geotermisen kaukolämmön asennettu kapasiteetti [Mwth] vuonna 2018 (Dumas, et al., 2019)**

Viime vuosina kiinnostus geotermisen energian hyödyntämiseen kaukolämmityksessä on kasvanut voimakkaasti myös tuliperäisten alueiden ulkopuolella. Tämä johtuu poraus-tekniikan kehittymisestä sekä tarpeesta vähentää hiilidioksidipäästöjä. Useita geotermisiä kaukolämpövoimaloita onkin rakennettu tai suunnitteilla ympäri maailmaa. Vuonna 2018 Euroopassa oli yli 300 geotermisellä energialla toimivaa kaukolämpöjärjestelmää, kun vastaava määrä vuonna 2010 oli 187. Vaikka geotermisen energia on kasvanut ja tulee kasvamaan nopeasti, ei kasvu ole kuitenkaan joidenkin asiantuntijoiden mielestä yhtä nopeaa kuin on oletettu. Geotermisen energian markkinat ovat vielä hyvin kehitymättömät, eikä teknologia ole vielä savuttanut kovin korkeaa kypsyysastetta. (Dumas, et al., 2019)

### 3.3 Tulevaisuuden näkymät

Fossiilisista polttoaineista luopumisen takia sekä kehittyneiden poraus-, lämmönvaihdin- ja lämpöpumpputekniikoiden ansiosta geotermisen energian käytön ennustetaan kasvavan tulevina vuosina merkittävästi. Erityisen nopeaa kasvun ennustetaan olevan juuri kaukolämpöjärjestelmillä. Eurooppa on johtanut geotermisen energian kehitystä ja Euroopassa geotermisen potentiaali on suurta. (Dumas, et al., 2019)

Kuvaan 2 on merkitty oranssilla alueet, joilla lämpötila kilometrin syvyydessä on yli 50 °C. Alueet, joilla lämpötila on yli 90 °C kahden kilometrin syvyydessä on merkitty punaisella, ja muut alueet, jotka soveltuvat hyvin geotermisen energian käyttöön on merkitty keltaisella.



**Kuva 2 Geotermisen kaukolämmön käyttöön hyvin soveltuvia alueita (Dumas, et al., 2019)**

Yli 90 °C lämmin vesi soveltuu useisiin kaukolämpöverkkoihin sellaisenaan. 60–90 °C lämpö voidaan hyödyntää kaukolämmön tuotannossa esimerkiksi juuri lämpöpumpuilla. Suomi kuuluu kuvan 2 kartalla harmaalle alueelle eli suomen geotermisen potentiaali on pientä. Huomionarvoista kuitenkin on, että myös Suomeen on rakenteilla kaukolämpöjär-

jestelmiä, kuten Otaniemen Deep Heat -projekti. Näissä järjestelmissä joudutaan poraamaan huomattavasti syvemmälle, esimerkiksi Otaniemen tapauksessa yli 6000 metriin, jotta vesi on tarpeeksi lämmintä kaukolämpöverkkoon (Pentti, 2020). Koska suomessa ei ole vielä geotermistä energiaa käytössä, myöskään käytännön kokemuksia sen käytöstä ei ole. Tutkimustietoa geotermisestä energiasta suomen olosuhteissa on saatavilla niukasti.

Geotermisen kaukolämmön taloudellisesti kannattavaan hyödyntämiseen tarvitaan maanalaisen lämpötilan lisäksi tarpeeksi tiheää asutusta. Monilla Euroopan väkirikkailla alueilla on suuri geotermisen potentiaali. Noin 20 % eurooppalaisista asuu alueilla, joilla lämpötila 2000 metrin syvyydessä on yli 60 °C. Dumasin ja Ruggeron mukaan geotermistä kaukolämpöä voidaan hyödyntää jokaisessa EU-maassa ja vuoteen 2050 mennessä geotermisen kaukolämpö voisi olla saatavilla 26 %:lle eurooppalaisista (Dumas & Ruggero, 2017).

### **3.4 Geotermisen energian hyödyntäminen Suomessa**

Geotermisen gradientti kuvastaa sitä kuinka paljon kallioperän lämpötila nousee mentäessä syvemmälle maan pinnan alle. Maapallon keskimääräinen geotermisen gradientti on noin 33 °C/km, tuliperäisillä alueilla se voi kuitenkin olla jopa 200 °C/km. Suomessa geotermisen gradientti on 8–25 °C/km, joka on selvästi keskimääräistä matalampi. (Dumas & Ruggero, 2017) (Huusko, 2016) Suomen geotermisen gradientti on erityisen matala, koska Suomi sijaitsee maailman vanhimpiin kuuluvalla Fennoskandian kilvellä, joten maansisäisten radioaktiivisten hajoamisten vaikutus jää alhaiseksi. Lisäksi Suomen kallioperän graniitin lämmönjohtavuus on matala, ja viimeisin jääkausi vaikuttaa yhä geotermiseen gradienttiin laskevasti. (Huusko, 2016)

Vaikka Suomessa geotermisen potentiaali on pientä, sen hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa olisi mahdollista ilman uuden verkon rakentamista. Suomesta löytyy laajalle levinneet kaukolämpöverkostot ja paljon kaukolämmön käyttäjiä. (Huusko, 2016), (Koskelainen, et al., 2006)

#### **3.4.1 Tehostettu geotermisen järjestelmä EGS**

Suomessa suunnitteilla ja rakenteilla olevia geotermisiä lämpölaitoksia kutsutaan tehostetuiksi geotermisiksi järjestelmiksi, englanniksi enhanced geothermal system (EGS). EGS toimii siten, että porataan kaksi syvää reikää tyypillisesti alle 1 km päähän toisistaan (Kukkonen, 2018). Vettä pumpataan toisesta reiästä alas kallioperään, jossa se lämpe-

nee ja kulkeutuu kallioperän halkeamia pitkin toiselle reiälle, josta lämmennyt vesi pumpataan takaisin maan pinnalle. EGS:llä pystytään hyödyntämään kallioperään sitoutunut geoterminen lämpö, vaikka maanalaista vesivarantoa ei olisi saatavilla. (Uski & Piipponen, 2019) (Kukkonen, 2018)

Syvällä kallioperässä olevat halkeamat voivat olla luonnostaan muodostuneita tai ne voidaan muodostaa keinotekoisesti prosessilla, jota kutsutaan hydrauliseksi stimuloinniksi (Kukkonen, 2018). Hydraulisella stimuloinnilla parannetaan kallioperän permeabiliteettia eli kiven veden läpäisykykyä. Hydraulisessa stimuloinnissa poratusta reiästä viimeiset 500–1000 metriä jätetään putkittamatta ja sinne pumpataan suuria määriä vettä, jolloin korkeapaineinen vesi avartaa kallioperässä olevia rakoja. Hydraulisesta stimuloinnista indusoituu pieniä järjestyksiä, joita paikantamalla voidaan selvittää veden virtausreitit. Tämän jälkeen toinen reikä porataan, kun tiedetään mihin valtaosa raoista on auennut. (Uski & Piipponen, 2019)

Rakoverkko tulee saada sopivan kokoiseksi, jotta vettä virtaa reikien välillä tarpeeksi ja lämpö siirtyy tehokkaasti kivistä veteen. Rakojen tulee olla tarpeeksi suuria, jotta vesi virtaa reikien välillä. Toisaalta liian suuret yksittäiset raot saavat veden virtaamaan liian nopeasti reiältä toiselle, jolloin lämpö ei ehdi siirtyä veteen. Väärään suuntaan auenneet pienet raot taas eivät välttämättä koskaan saavuta ulosottoreikää, jolloin vesi jää kallioperään. (Uski & Piipponen, 2019)

Hydraulinen stimulointi indusoi aina pieniä maanjärjestyksiä ja suurempien järjestysten riskien hallinta on oleellinen osa hanketta. Geotermisissä projekteissa seismisyyden tarkkailu on tärkeä osa stimulointia. (Uski & Piipponen, 2019) Vuonna 2017, Etelä-Koreassa tapahtui tuhoisin EGS-hankkeen aiheuttama järjestys. Stimuloinnista aiheutui kaksi kuukautta sen loppumisen jälkeen 5,4M maanjärjestys, jossa loukkaantui 135 ihmistä ja kokonaiskustannukset nousivat yli 300 miljoonaan Yhdysvaltain dollariin. (Kim, et al., 2019) Suomen vakaa kallioperä pienentää näitä riskejä (Uski & Piipponen, 2019). Otaniemenkin stimuloinnista aiheutui mikrojärjestyksiä, jotka voitiin havaita äänenä, mutta niistä ei aiheutunut vaurioita ihmisille tai rakenteille (St1, 2020).

### **3.4.2 Geotermisten kaivojen poraus**

Poraaminen ja maanpinnan alaiset työt muodostavat suurimman osan tehostetun geotermisen järjestelmän kustannuksista, 60–80 % (Yost, et al., 2015). Porauksen osuus korostuu erityisesti Suomessa, jossa joudutaan poraamaan syvälle, 6–7 kilometriin (Huusko, 2016). Viime vuosina kehittynyt poraustekniikka on kuitenkin mahdollistanut geotermisten pilottihankkeiden toteuttamisen myös Suomessa (Pentti, 2020). Syvien

geotermisten kaivojen poraamisen onnistuminen edellyttää, että energiaa saadaan tehokkaasti siirrettyä maan pinnalta reiän pohjalle ja vastaavasti reiän pohjalta irrotettu maa-aines maan pinnalle, jottei energiaa tuhlaantuisi kiviaineksen hienontamiseen. (Teodoriu & Cheuffa, 2011) (Vollmar, et al., 2015)

Geotermisten kaivojen poraamiseen voidaan käyttää rotaatioon, perkussioon tai lämpöön perustuvia poraustekniikoita. Rotaatiotekniikka on perinteistä poraamista, jossa energia tuotetaan maan pinnalla ja johdetaan reiän pohjalle poraa pitkin pyörimisliikkeenä. Rotaatiotekniikka on vanhinta ja koetelluinta tekniikkaa. Rotaatiotekniikka soveltuu erityisesti hauraampien kiviainesten poraamiseen ja sitä onkin yleisesti käytetty Keski-Euroopan geotermisten kaivojen porauksessa, jossa kallioperä koostuu hauraasta hiekkakivestä. (Finger & Blankenship, 2010) (Teodoriu & Cheuffa, 2011)

Perkussioon perustuvissa poraustekniikoissa kiviaines hajotetaan hakkaavalla liikkeellä. Perkussioon perustuvia tekniikoita ovat esimerkiksi vesi- ja ilmavasaratekniikat, joissa energia välitetään maan pinnalta reikään veden tai ilmanpaineen avulla. Energiansiirto maanpinnalta syvän kaivon pohjalle on perkussioon perustuvilla tekniikoilla erittäin tehokasta. Energian tehokas siirtäminen onkin tärkeää koska porat kuluttavat huomattavan määrän energiaa. (Finger & Blankenship, 2010) Esimerkiksi Otaniemessä käytetyn poran liityntäteho sähköverkkoon oli 6,5 MW (St1, 2016). Tehokas energiansiirto maanpinnalta reikään korreloi myös porausnopeuden kanssa. Vesivasaratekniikalla kiviaineksen nosto syvältä onnistuu tehokkaasti nesteiden avulla. Perkussiotekniikat soveltuvat erityisesti vakaiden kivilajien, kuten suomalaisen graniitin poraamiseen, koska kestävä graniittia porattaessa sortumisen vaara ei ole yhtä suuri kuin esimerkiksi hiekkakiveen porattaessa (Finger & Blankenship, 2010) (Huusko, 2016). Otaniemen geotermisen lämpölaitoksen reiät porattiin ensin ilmavasaraa käyttäen sitten vesivasarateknologialla ja viimeiset kilometrit rotaatiotekniikalla (ST1, 2020). Uusinta tekniikkaa edustavat lämpöön perustuvat poraustekniikat, niissä energia siirretään maanpinnalta reikään sähkövirralla, ja kiviaines sulatetaan plasman avulla.

Kaivon sortuminen on suurimpia riskejä geotermisten kaivojen porausoperaatioissa, koska kaivon sortuessa poranterä menetetään ja kaivo joudutaan poraamaan uudestaan pitkältä matkalta. Sortumisen välttämiseksi reikä täytyy putkittaa tasaisin väliajoin, jonka jälkeen poraamista on jatkettava pienemmällä terällä. (Finger & Blankenship, 2010) (Teodoriu & Cheuffa, 2011) Kaivon sortumisriski on kuitenkin Suomessa todennäköisesti pienempi kuin suuressa osassa maailmaa kallioperän kovan graniitin takia. Myös poranterien vaihto on haasteellista porakankien painon noustessa mitä syvemmälle mennään. (Teodoriu & Cheuffa, 2011)

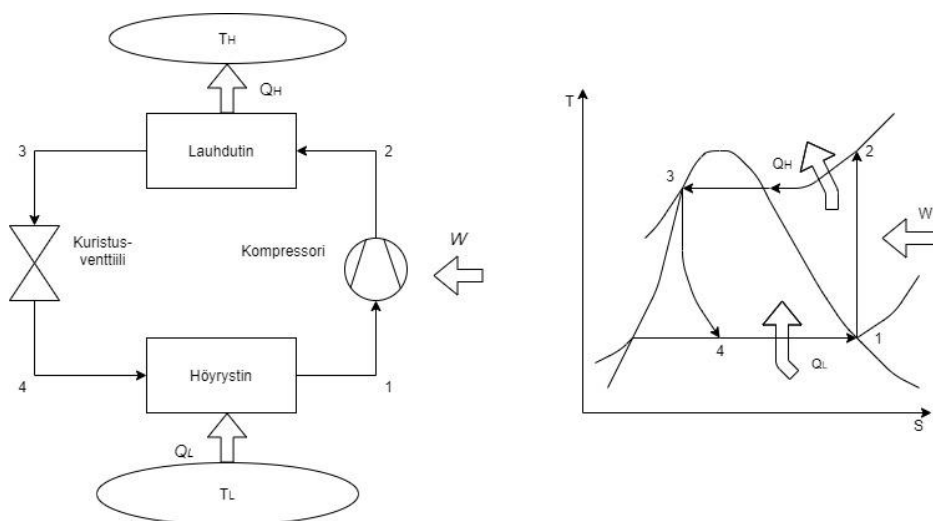
## 4. LÄMPÖPUMPUT

Lämpöpumppu on laite, joka faasimuutoksia hyväksikäyttäen siirtää lämpöä kylmästä lämpövarastosta lämpimämpään. Täten lämpöpumppuja voidaan käyttää sekä jäähdyttämiseen että lämmittämiseen. Lämpöpumput voivat hyödyntää geotermistä energiaa lämmönlähteenään ja näin tuottaa lämpöenergiaa kaukolämpöverkkoon. (Cengel & Boles, 2011) (Grassi, 2018)

### 4.1 Kompressiolämpöpumput

Lämpöpumppu koostuu yksinkertaisimmillaan kompressorista, kuristusventtiilistä, kahdesta lämmönsiirtimestä (eli lauhduttimesta ja höyrystimestä) ja kylmäaineesta, joka kiertää näiden komponenttien välillä. (Grassi, 2018)

Lämpöpumppu toimii siten, että kompressorin kylläisenä höyrynä tulevan kylmäaineen painetta kasvatetaan. Paineen kasvaessa kylmäaineeseen siirtyy myös lämpöenergiaa ja kylmäaineesta tulee tulistettua höyryä. Kompressorin jälkeen, tulistettu kylmäaine siirtyy lauhduttimeen, jossa höyry lauhtuessaan luovuttaa lämpöenergiaa ympäristöön, joka tässä tapauksessa on kaukolämpöverkko. Lauhduttimen jälkeen kylmäaine kulkeutuu kuristusventtiiliin kautta höyrystimeen. Kuristusventtiilissä kylmäaineen paine laskee. Höyrystimessä kylmäaine höyrystyy, kunnes se on täysin kylläistä höyryä. Höyrystyvä kylmäaine sitoo itseensä lämpöä kylmävarastosta. Tämän jälkeen kylläinen kylmäaine siirtyy taas kompressorin ja kierto alkaa alusta. Tämä prosessi on esitettyä kuvassa 3.



**Kuva 3 Lämpöpumpun komponentit ja toiminta  $T,s$  tasossa**



Lämpöpumppujen suorituskyvyn kannalta tärkein mittari on COP-kerroin (coefficient of performance). COP-kerroin määritetään lämpöpumpuille siirtyneen lämmön ja käytetyn työn suhteena. Toisin sanoen, COP kertoo kuinka paljon lämpö- tai jäähdytysenergiaa lämpöpumppu tuottaa suhteessa kompressorin vaatimaan energiaan. COP-kerroin kylmälaitteelle on kylmäkerroin eli  $COP_R$  ja lämmitykseen käytettävälle lämpöpumpulle lämpökerroin eli  $COP_{HP}$ . (Cengel & Boles, 2011)

$COP_{HP}$ :n on aina  $COP_R+1$ , koska kompressorin mekaanisessa puristuksessa syntyy myös lämpöenergiaa, joka käytetään hyödyksi lämmitettäessä. Kompressorissa syntynyt lämpöenergia menee hukkaan, jos lämpöpumppua käytetään jäähdytykseen. Kaavoissa 1 ja 2 esitetään  $COP_{HP}$  ja  $COP_R$  laskeminen. (Cengel & Boles, 2011)

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} = \frac{Q_H}{W} \quad (1)$$

$$COP_R = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} = \frac{Q_C}{W} \quad (2)$$

joissa  $Q_H$  on lämpimään varastoon siirtyvä lämpö,  $Q_C$  on kylmästä varastosta otettu lämpö ja  $W$  on kompressorin tekemä työ.

Lämpöpumpun toiminnan kannalta on oleellista, että kylmäaineen lämpötila nousee kompressorissa tarpeeksi paljon korkeammalle kuin lämmitettävän kohteen, jotta lämpö siirtyisi lämmitettävään kohteeseen. Samoin kylmäaineen lämpötilan täytyy laskea tarpeeksi alas kylmällä puolella, jotta lämpö siirtyy varastosta kylmäaineeseen. Paine-eron täytyy vastaavasti olla tarpeeksi suuri, jotta kylmäaine tiivistyy nesteeksi lämpimällä puolella ja höyrystyy kylmällä puolella. Toisin sanoen, mitä suurempi lämpötilaero kuuman ja kylmän puolen välillä on, sitä suurempi paine-ero vaaditaan ja sitä enemmän työtä kompressorin joutuu kylmäaineen paineen nostamiseen tekemään. Edellä mainitun takia lämpökerroin riippuu voimakkaasti kuuman ja kylmän varaston lämpötilaeroista. (Cengel & Boles, 2011)

COP-arvolle voidaan määrittää Carnot-periaatteen avulla teoreettinen maksimi. Carnot-maksimit lämmitykseen ja jäähdytykseen käytettäville lämpöpumpuille on esitetty kaavoissa 3 ja 4. Lämpöpumpun teoreettinen maksimi riippuu täysin kylmän ja kuuman lämpötilan lämpötilaerosta.

$$COP_{HP\ MAX} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (3)$$

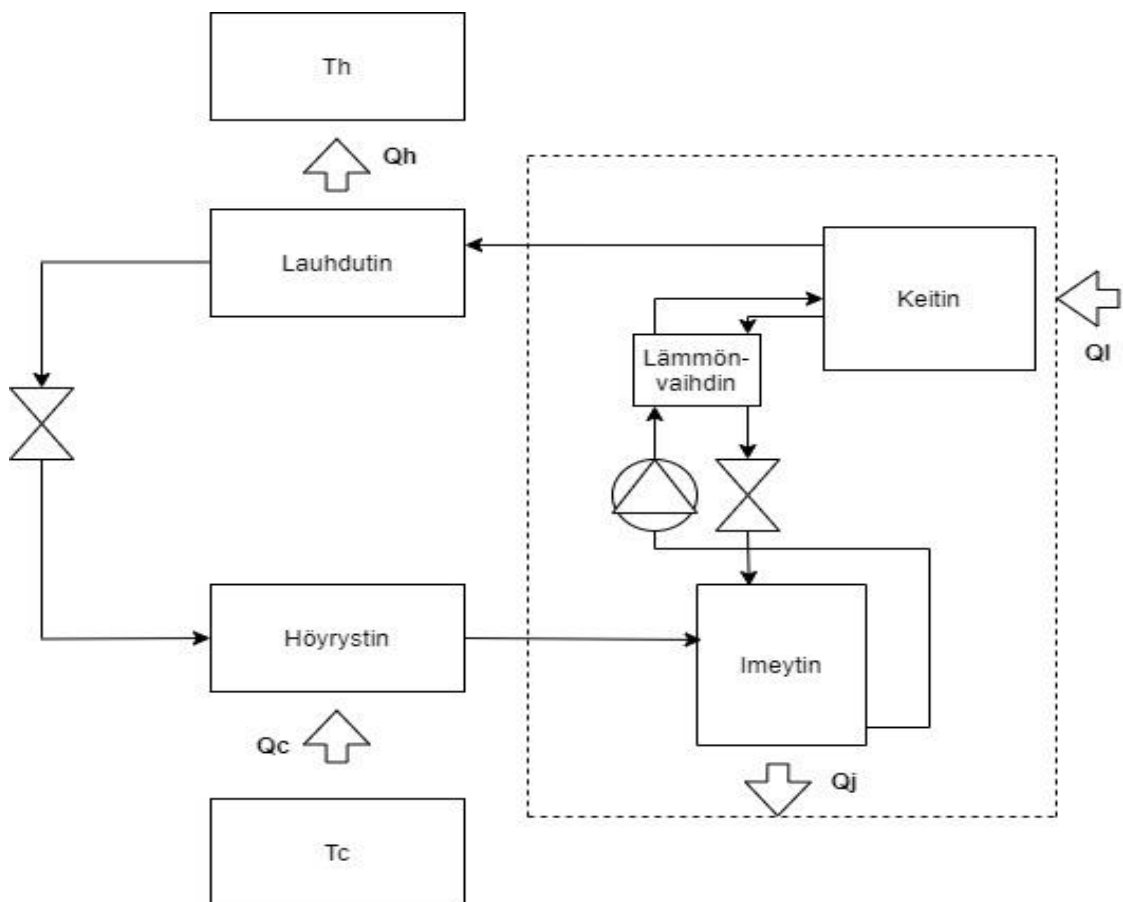
$$COP_{R\ MAX} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (4)$$

joissa  $T_H$  on lämpimän varaston lämpötila ja  $T_C$  on kylmän varaston lämpötila. (Grassi, 2018) Todellisen lämpöpumpun COP-kerroin riippuu kuitenkin voimakkaasti pumpun

teknisistä ominaisuuksista eikä lähelle Carnot-maksimia yleensä päästä. Teollisissa lämpöpumpuissa COP vaihtelee yleisesti 0,4–5, ja on noin 35–75 % Carnot-maksimista. Tätä suhdetta todellisen COP-kertoimen ja ideaalisen COP välillä kutsutaan Carnot-hyötysuhteeksi. (Maaskola & Kataikko, 2014)

## 4.2 Absorptiolämpöpumput

Absorptiolämpöpumpuilla pystytään, samaan tapaan kuin kompressiolämpöpumpuilla, siirtämään lämpöä kylmästä lämpimään, mutta pumpun toimintaperiaate on erilainen. Absorptiolämpöpumput käyttävät toimintaansa mekaanisen työn sijasta lämpöä. Niiden toiminta perustuu liuokseen, jossa on kahta eri ainetta, joilla on erisuuret höyrönpaineet.



**Kuva 4 Absorptiolämpöpumpun toiminta**

Liuokset koostuvat useimmiten vedestä ja litiumbromidista tai vedestä ja ammoniakista. Absorptiolämpöpumpussa on kompressorin sijaan imeytin, keitin ja pumppu.

Kuvassa 4 on esitelty vesi-ammoniakki absorptiolämpöpumpun toiminta. Höyrystin, lauhdutin ja kuristusventtiili toimivat samaan tapaan kuin perinteisessä kompressiolämpöpumpussa. Näissä edellä mainituissa komponenteissa kiertää kylmäaineena puhdasta ammoniakkia.

Katkoviivalla erotettu alue toimii kompressorin sijaan ammoniakin paineen nostajana. Kun kaasumainen ammoniakki tulee höyrystimestä imeyttimeen, sitä jäähdytetään ja se liukenee imeyttimeessä olevaan veteen. Ammoniakin liukenemisen seurauksena imeyttimeen syntyy vahvaa vesiammoniakkiliuosta. Tämä vahva vesiammoniakkiliuos pumpataan korkeampaan paineeseen pumpun avulla. Seuraavaksi korkeapaineinen vahva vesiammoniakkiliuos kulkeutuu lämmönvaihtimen kautta keittimeen. Keittimessä sitä lämmitetään entisestään, jolloin ammoniakki höyrystyy. (Grassi, 2018)

Seuraavaksi kaasumainen korkeassa paineessa oleva ammoniakki kulkeutuu lauhduttimeen ja sen kierto jatkuu kuten kompressiolämpöpumpussakin. Jäljelle jäänyt heikko vesiammoniakkiliuos palaa takaisin imeyttimeen lämmönvaihtimen ja kuristusventtiilin kautta. Litium-bromidi lämpöpumppu toimii samaan tapaan, mutta siinä vesi toimii kylmäaineena ja litiumbromidi liuottimena. (Grassi, 2018)

Etuna absorptiolämpöpumpussa kompressiolämpöpumppuun verrattuna on, että paineen nosto toteutetaan nesteelle, joka kuluttaa huomattavasti vähemmän energiaa kuin vastaava paineen nosto kaasulle. Toisaalta veden ja ammoniakin erottelemiseen tarvitaan lämpöenergiaa. Absorptiolämpöpumppujen etuna on myös niiden korkea lämpötilan nostokyky jopa 150 °C:een. Absorptiolämpöpumppuja pidetään luotettavina ja niiden säädettävyys on hyvä. Toisaalta absorptiolämpöpumppujen COP-kerroin, joka on yleensä 1,5–1,8, jää hieman kompressiolämpöpumppujen kerrointa alhaisemmaksi. (Maaskola & Kataikko, 2014)

Kompressio- ja absorptiolämpöpumput voidaan myös yhdistää. Näitä lämpöpumppuja kutsutaan nimellä hybridikompressio-absorptiolämpöpumppu (Hybrid compression absorption heat pump, HCAHP). HCAHP pumpuissa on sekä kompressorin että pumppu, joilla toteutetaan paineen nosto, sekä höyrynerotin, joka erottelee neste- ja kaasumaisen kylmäaineen. HCAHP:eilla päästään korkeampiin lämpötiloihin ja pystytään toteuttamaan suurempia lämpötilan nostoja kuin kompressiolämpöpumpuilla. Jensen et al. tutkimuksessa HCAHP:lla pystyttiin nostamaan lämmitetty vesi jopa 150 °C:seen COP-kerroimen ollessa absorptiolämpöpumppuja korkeammalla tasolla, ja toteuttamaan 60 °C:en lämpötilan nosto taloudellisemmin kuin kaasupolttimella. HCAHP oli myös parasta luonnollisilla kylmäaineilla toimivaa kompressorilämpöpumppua taloudellisempi yli 80 °C:en lämpötiloilla. (Jensen, et al., 2015)

Markkinoilla on tällä hetkellä yksi kaukolämpöveden tuottamiseen soveltuva hybridiabsorptio-kompressiolämpöpumppu. Valmistajan mukaan tällä pumpulla päästään jopa 120 °C:een lämpötiloihin ja 4,5 COP-kertoimeen. (Arpagaus, et al., 2018)

### 4.3. Korkealämpöpumput

Tavallisilla kompressiolämpöpumpuilla pystytään tuottamaan maksimissaan noin 85–90 °C:een lämpötiloja, joka on talvisin liian matala Suomen kaukolämpöverkkoihin, jos kallista kaukolämpöveden priimaamista ei haluta käyttää (VP Oy, 2016). Lämpöpumppuja, joilla pystytään tuottamaan tätä korkeampia lämpötiloja, kutsutaan korkealämpöpumpuiksi. Markkinoilla on tällä hetkellä yli 20 lämpöpumppua, jotka pystyvät tuottamaan vähintään 90 °C:een lämpötiloja ja useita, joilla päästään vähintään 120 °C:een lämpötiloihin (Arpagaus, et al., 2018). Kobe Steel markkinoi SGH165 lämpöpumppua markkinoiden korkeimpiin lämpötiloihin pääseväenä lämpöpumppuna. SGH165 lämpöpumppu pääsee jopa 165 °C:een lämpötiloihin (Daisuke, et al., 2013). Suomalaisissa kaukolämpöverkoissa ei 165 °C:een lämpötiloja kuitenkaan esiinny ja paremmin kaukolämpöveden tuotantoon soveltuvat lämpöpumput, jotka pystyvät tuottamaan 110–130 °C:een lämpötiloja. Korkealämpöpumppujen COP-kertoimet liikkuvat välillä 2,4–5,8 kun kylmän ja kuuman varaston lämpötilaero on 40–95 °C. Tällöin pumppujen Carnot-hyötysuhteeksi saadaan 40–60 %. (Arpagaus, et al., 2018)

Markkinoilla olevista korkealämpöpumpuista yksi on hybridikompressio-absorptio- ja muut kompressiolämpöpumppuja, mutta tutkimuksissa myös absorptiolämpöpumpuilla on pystytty tuottamaan kaukolämpöveden vaatimia lämpötiloja. (Arpagaus, et al., 2018) (Maaskola & Kataikko, 2014)

Korkeita lämpötiloja tuottaessa myös painetasot nousevat korkealle eli koko järjestelmän materiaalien täytyy kestää korkeiden lämpötilojen lisäksi korkeita paineita. Korkeita paineita kestävät materiaalit nostavat korkealämpöpumppujen hintaa. Myös kompressorin täytyy kyetä suoriutumaan korkeasta paineen nostosta. Nykyisellä kompressoriteknikalla päästään noin 25 baarin paineisiin. (Arpagaus, et al., 2018)

### 4.4 Kylmäaineet

Kylmäaineiden ominaisuudet vaikuttavat suuresti siihen voidaanko lämpöpumpulla hyödyntää geotermistä energiaa kaukolämmön tuotantoon. Näistä ominaisuuksista tärkeimpiä ovat kylmäaineen kriittisen pisteen lämpötila ja paine, lämpöpumpun painesuhde ja kylmäaineen höyrystymislämpötila ilmanpaineessa. (Arpagaus, et al., 2018) Kriittinen piste on se piste, jota suuremmilla paineilla tai lämpötiloilla aineella ei ole erillisiä neste- ja kaasufaaseja. Lauhduttimen lämpötilan noustessa lähelle kylmäaineen kriittisen pisteen lämpötilaa lauhtumisentalpia pienenee. Lauhtumisentalpian pieneneminen taas pienentää lämpöpumpun COP-kerrointa. (Aittomäki, et al., 2008) Lauhduttimen lämpötilan

on oltava 10–15 °C matalampi kuin kylmäaineen kriittisen pisteen lämpötila, jotta lämpöpumppu toimii alikriittisenä (Arpagaus, et al., 2018). Markkinoilla on kuitenkin myös hiilidioksidilla toimivia ylikriittisiä lämpöpumppuja (Grassi, 2018).

Hyvällä kylmäaineella kriittisen pisteen lämpötila on korkea, sillä mitä korkeampi kylmäaineen kriittisen pisteen lämpötila, sitä lämpimämpää kaukolämpövettä lämpöpumpulla voidaan tuottaa. Lisäksi hyvällä kylmäaineella tulee olla mahdollisimman matala kriittisen pisteen paine, sillä se pienentää lauhduttimen ja höyrystimen paineen suhdetta, eli lämpöpumpun painesuhdetta. Pienellä painesuhteella myös tarvittava puristustyö on pieni, joten kompressorin kuluttaa vähemmän energiaa. (Aittomäki, et al., 2008) Lisäksi kylmäaineen höyrystymislämpötilan ilmanpaineessa on oltava matalampi kuin geotermisen veden lämpötila, jotta lämpö siirtyy geotermisestä vedestä kylmäaineeseen. Ilmanpainetta pidetään höyrystimen paineen alarajana, jottei ilmaa pääsisi kylmäaineen sekaan. (Arpagaus, et al., 2018)

Hyvällä kylmäaineella on myös pieni viskositeetti, jotta painehäviöt pysyvät pieninä ja hyvä lämmönjohtavuus, jotta lämpö siirtyy tehokkaasti höyrystimessä ja lauhduttimessa. Lisäksi kylmäaineen täytyy olla kemiallisesti stabiili lämpöpumpun toimintaolosuhteissa eikä se saa reagoida pumpun materiaalien, esimerkiksi kompressorin metallien tai öljyjen, kanssa. Kylmäaineen on myös mahdollisuuksien mukaan oltava palamatonta ja myrkytöntä. (Aittomäki, et al., 2008) (Arpagaus, et al., 2018)

Kaikkien edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi otsonikerrosta ohentavien ja voimakkaiden kasvihuonekaasujen käyttöä kylmäaineina on rajoitettu. Kasvihuonekaasujen ilmaston lämmitysvaikutusta kuvataan GWP-arvolla (Global Warming Potential). GWP-arvo kertoo, kuinka voimakas kasvihuonekaasu aine on hiilidioksidiin verrattuna. (Aittomäki, et al., 2008) Kylmäaineiden ympäristövaikutuksista kerrotaan lisää alaluvussa 5.4. Kylmäaineen valinta onkin aina kompromissi haluttujen ominaisuuksien välillä. Korkealämpöpumpuissa kylmäaineista suosituimpia ovat R245fa, R717, R744, R134a ja R1234ze(E) (Arpagaus, et al., 2018). Taulukkoon 1 on koottu korkealämpöpumpuissa yleisesti käytettyjen kylmäaineiden ominaisuuksia.

**Taulukko 1. Korkealämpöpumpuissa käytettyjen kylmäaineiden ominaisuuksia (Arpagaus, et al., 2018), (Fukuda, et al., 2014)**

Kylmäaine	Kriittinen lämpötila [°C]	Kriittinen paine [bar]	Höyrystymislämpötila 1 atm:ssä [°C]
R134a	101,0	40,7	-26,1
R245fa	154,0	15,1	15,1
R1234ze(E)	109,4	36,4	-19,0
R717 eli NH <sub>3</sub>	132,4	113,5	-33,2
R744 eli CO <sub>2</sub>	31,4	73	-78,5
R1234ze(Z)	150,1	35,3	9,8
R1336mzz(Z)	171,3	29,0	33,4

Kaikilla taulukon 1 kylmäaineilla voidaan tuottaa yli 90 °C:een lämpötiloja, ja jokaisella on omat vahvuutensa sekä heikkoutensa. R245fa on termodynaamisilta ominaisuuksiltaan kaukolämmön tuotantoon erinomaisesti soveltuva, sen kriittinen paine on alhainen ja kriittinen lämpötila taas korkea. R134a taas on erittäin edullista 10 €/kg, mutta sillä ei päästä aivan yhtä korkeisiin lämpötiloihin. Toisaalta sillä pystytään alhaisen höyrystymislämpötilansa ansiosta hyödyntämään myös hyvin matalalämpöiset lämmönlähteet. (Arpagaus, et al., 2018) R134a:n ja R245fa:n GWP-arvot ovat kuitenkin niin korkeita, että niiden käyttö tulee loppumaan vähitellen F-kaasuasetuksen myötä (Teknologiateollisuus ry, 2015). R1234(E) on ominaisuuksiltaan samankaltainen kuin R134a muttei yhtä voimakas kasvihuonekaasu (Fukuda, et al., 2014). R1234ze(E) onkin yleisesti korvannut R134a:n käyttöä, vaikka se onkin noin viisi kertaa kalliimpaa kuin R134a.

Ammoniakin kriittinen lämpötila soveltuu hyvin kaukolämpöveden tuottamiseen, mutta sen kriittinen paine on korkea, ja se on myrkyllistä sekä palavaa. Ammoniakkia käytetään usein erityisesti absorptiolämpöpumpuissa. (Aittomäki, et al., 2008) Hiilidioksidin Kriittinen lämpötila on todella alhainen mutta se on ainoa kylmäaine, jota käytetään yli kriittisenä, joten silläkin päästään jopa 120 °C lämpötiloihin. Hiilidioksidi on myös kylmäaineena vaaratonta ja ympäristö ystävällistä. (Grassi, 2018)

Kaksi taulukon alinta kylmäainetta eivät ole vielä yleisessä käytössä, mutta ne ovat erittäin lupaavia kylmäaineita kaukolämmön tuottamiseen. R1234ze(Z):n GWP-arvo on todella pieni. Fukuda et al.:n tutkimuksessa sille saatiin optimaalinen COP-kerroin noin

130 °C:een tuotantolämpötilassa, joten se soveltuisi hyvin kaukolämmön tuottamiseen myös talvisin. R1336mzz(Z) kriittisen pisteen lämpötila on vielä korkeampi kuin R1234ze(Z) ja kriittisen pisteen paine matalampi. Se ei myöskään ole palavaa eikä myrkyllistä. Markkinoilla oleva Viking Heating Engines AS:n Heat Booster S4 -korkealämpöpumppu käyttää jälkimmäistä kylmäaineenään. (Fukuda, et al., 2014) (Arpagaus, et al., 2018)

## 5. GEOTERMISEN ENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN LÄMPÖPUMPUILLA

Geotermistä energiaa on Euroopassa ja Suomessakin laajasti saatavilla, mutta se on usein lämpötilaltaan liian matalaa hyödynnettäväksi suoraan kaukolämmityksessä. Lämpöpumput voivat mahdollistaa matala- ja keskilämpötilaisten geotermisten varantojen hyödyntämisen taloudellisesti ja ympäristöystävällisesti. Tässä luvussa kerrotaan tarkemmin geotermisellä energialla toimivista lämpöpumpuista.

### 5.1 Edut

Lämpöpumpuilla pystytään hyödyntämään kaukolämmön tuotantoon sellaisetkin geotermiset energialähteet, joiden lämpötila on matalampi kuin kaukolämpöveden. Näiden hyödyntäminen olisi ilman lämpöpumppuja mahdotonta. Lämpöpumpun kanssa toimivan geotermisen kaivon ei tarvitse olla yhtä syvä kuin suoraan kaukolämpönä hyödynnettävän kaivon.

Lämpöpumpuilla voidaan saavuttaa taloudellista hyötyä, vaikka geoterminen vesi olisi lämpötilaltaan suoraan kaukolämpöverkkoon soveltuvaa, sillä COP-kerroin nousee korkeaksi, kun kuumen ja kylmän lämpövarannon ero on pieni. Tämä havaittiin esimerkiksi Halitin ja Oguzin tutkimuksessa, jossa verrattiin geotermisen energian käyttämistä kaukolämpöverkossa lämpöpumpuilla ja ilman. Käytetyn geotermisen veden lämpötila oli 133,5 °C, eli se oli jo sellaisenaan kaukolämpöverkkoon soveltuvaa. Lämpöpumpuilla onnistuttiin lämmittämään 13776 taloutta kun ilman lämpöpumppua geotermisellä varannolla pystyttiin lämmittämään 600 taloutta vähemmän. Lämpöpumppua käyttämällä saavutettiin myös suurta taloudellista hyötyä suoraan geotermisen energian hyödyntämiseen verrattuna. (Arat & Arslan, 2017).

Energiategollisuuden teettämän raportin mukaan mahdollisesti suurin hyöty, joka suurista lämpöpumpuista saadaan, on lämpöpumppujen kyky lisätä kaukolämpöjärjestelmään joustavuutta. Lämpöpumput kaukolämmön tuotannossa lisäävät kaukolämpöjärjestelmän joustavuutta, koska pumppujen käynnistysaika on hyvin lyhyt ja käynnistyskustannukset pieniä. Lisäksi lämpöpumppulaitokset koostuvat usein useista koneikoista, joten laitoksia on helppo ajaa osakuormalla. Edellä mainitut hyödyt vähentävät tarvetta ajaa suuria CHP-laitoksia (Combined Heat and Power), eli laitoksia, joissa tuotetaan sekä lämpöä että sähköä, osakuormalla, joka taas parantaa koko järjestelmän kannattavuutta. (VP Oy, 2016)



Tanskassa on tutkittu myös vaihtoehtoa, jossa absorptiolämpöpumppu tuottaisi kaukolämpöä geotermisestä energiasta CHP-jätteenpolttolaitoksen väliottohöyryllä. Tällä tavalla pystyttäisiin paremmin optimoimaan CHP-laitoksen lämmön ja sähkön tuotantoa sähkön hinnan mukaan, vaikka jätteenpolttolaitos toimisi tyypilliseen tapaan peruskuormalaitoksena. (Ostergaard & Lund, 2011) Absorptiolämpöpumppu kykenee toimimaan myös esimerkiksi moottorivoimalaitoksen savukaasuilla. Tätä on tutkittu (Keil, et al., 2008). Edellä mainittujen kaltaisten järjestelyiden taustalla on paitsi halu pienentää primäärienergian kulutusta ja ympäristövaikutuksia myös mahdollisuus integroida sähkö- ja lämmöntuotantojärjestelmiä, jolloin uusiutuvien sähköntuotantomuotojen aiheuttaman sähkön hinnan heilahtelua voitaisiin tasoittaa kaukolämpömarkkinoilla. Samalla saataisiin taloudellista hyötyä sähkön hinnan vaihtelusta. Myös tavallisilla kompressiolämpöpumpuilla voitaisiin osallistua sähkömarkkinoille, erityisesti jos pumpput ovat yhdistettynä lämpöakkuun. Tällöin sähkön ollessa halpaa voitaisiin tuottaa lämpöä akkuun ja taas sähkön ollessa kallista lämpöpumppeja voitaisiin ajaa alas. (VP Oy, 2016)

Kiinassa on tehty huomattava määrä tutkimusta geotermisistä absorptiolämpöpumpuista kaukolämmön tuotannossa. (Song, et al., 2019), (Li, et al., 2011) tutkittiin geotermisellä energialla toimivia lämpöpumppeja. Maalämpöpumppeja tutkittiin (Qunli, et al., 2019) ja (Qunli, et al., 2015). Edellä mainituissa tutkimuksissa absorptiolämpöpumppejen on havaittu olevan ympäristöystävällisempiä ja taloudellisesti kannattavampia kuin tilanne, jossa niitä ei ole käytetty tai on käytetty kompressiolämpöpumppeja.

Kiinan kaukolämpöjärjestelmä poikkeaa kuitenkin suomalaisesta eikä samanlaisia hyötyjä välttämättä saavutettaisi Suomessa. Kiinan kaukolämpöjärjestelmissä on suomalaisista poiketen lämmönvaihdinasemia, joihin liittyy sekundäärinen verkko. Tämä sekundääriverkko kattaa yleensä 20–30 rakennusta. (Sipilä, et al., 2016) Edellisessä kappaleessa mainituissa tutkimuksissa absorptiolämpöpumput siirsivät geotermistä energiaa sekundääriseen kaukolämpöverkkoon käyttämällä primäärisen verkon lämpöenergiaa (Song, et al., 2019), (Li, et al., 2011), (Qunli, et al., 2019), (Qunli, et al., 2015). Suomessa taas vastaavat lämmönvaihtimet sijaitsevat jokaisen rakennuksen lämmönjakohuoneessa ja näin siirtävät lämpöä vain yhdelle rakennukselle (Sipilä, et al., 2016).

Useissa tutkimuksissa geotermisillä lämpöpumpuilla on onnistuttu huomattavasti pienentämään primäärienergian kulutusta (Wu, et al., 2014), (De Carli, et al., 2014), (Kljajic, et al., 2018) (Ostergaard & Lund, 2011). Primäärienergian kulutuksen pieneminen tuo mahdollisesti säästöjä, pienentää riippuvuutta ulkomaisista polttoaineista ja suojaaa polttoaineiden hintojen heilahtelulta.

Geotermisten lämpöpumppujen käytön etuihin lukeutuu myös lämmön tuotantorakenteen monipuolistaminen ja siten riskien hajauttaminen (VP Oy, 2016). Geotermiset lämpöpumput eivät tarvitse ulkomaisia polttoaineita ja täten vähentävät energiariippuvuutta. Geotermisellä energialla toimivat lämpöpumput eivät myöskään aiheuta paikallisia päästöjä ja geotermistä energiaa on saatavilla lähes kaikkialla (Kljajic, et al., 2018) (Bonafin, 2017). Geotermisten lämpöpumppujen etuna on myös mahdollisuus tuottaa kaukokylmää jopa samanaikaisesti kaukolämmön kanssa, jolloin pumpun kuluttamalle energialle saadaan enemmän rahallista vastinetta (VP Oy, 2016).

Suuret kaukolämmön tuotantoon tarkoitetut lämpöpumput ovat käyttöikänsä pitkäikäisiä. Ruotsissa niitä on ollut toiminnassa jo 1980-luvulta lähtien, ja ne ovat ylittäneet alun perin suunnitellun käyttöikänsä (Averfalk, et al., 2017). Käyttöikänsä ylittyminen viittaa myös siihen, että pumput ovat olleet investointeina kannattavia.

Geotermisen energian vakautta voidaan myös pitää etuna suhteessa muihin lämpöpumppujen lämmönlähteisiin. Geotermisen energian käyttö lämmönlähteenä pienentää riskiä lämmönlähteen hinnan ja lämmön muutoksista. Nämä ovat riskeinä esimerkiksi teollisuuden hukkalämpöä hyödynnettäessä. Geotermisen lämpö on myös saman lämpöistä vuoden ajasta ja säästä riippumatta toisin kuin esimerkiksi yhdyskunnan jätevedet (VP Oy, 2016).

## 5.2 Haasteet

Geotermisten lämpöpumppujen hyödyntämiseen kaukolämmön tuotannossa liittyy joitakin teknisiä ja taloudellisia haasteita. Yksi haaste on kompressiolämpöpumppujen suuri sähkötehon tarve. Kompressiolämpöpumppu saattaa käynnistyessään tarvita jopa 7-kertaisen sähkötehon normaaliin käyttötilanteen vaatimaan tehoon verrattuna. Suurien kaukolämpöä tuotavien lämpöpumppujen tulee siis sijaita vahvassa pisteessä sähköverkkoa. (VP Oy, 2016) Sähköverkon rakentaminen lämpöpumppua varten on erittäin kallista ja lisää jo ennestään korkeita investointikustannuksia.

Toinen merkittävä tekninen haaste on saada lämpöpumpuista ulos tarpeeksi lämmintä vettä kaukolämpöverkkoon, kun kaukolämpöveden lämpötila on korkea. Lämpöpumpuista ulos saatava vesi on yleensä maksimissaan 85–90 °C. Tämä ei ole ongelma kesäisin, kun kaukolämpöveden menolämpötila on samaa luokkaa, mutta talvisin kaukolämpöveden menolämpötila on huomattavasti korkeampi, jopa 110–120 °C luokkaa. Tällöin lämpöpumpun tuottamaa vettä on priimattava, eli sen lämpötilaa on nostettava jollain muulla lämmitystekniikalla. Priimaaminen lisää kustannuksia merkittävästi. (VP Oy, 2016) Lisäksi jos tavoitteena on minimoida kasvihuonepäästöjä ja polttoaineen käyttöä,

ei priimaamiseen mahdollisesti käytettävä kattila tue näihin tavoitteisiin pääsyä. Luvussa 4 on esitetty tekniikoita, joilla voidaan saavuttaa korkeampia lämpötiloja, mutta ne ovat yleensä kalliimpia. Lisäksi talvella haasteena on lämpöpumppujen COP-kertoimen huonontuminen. Carnot-periaatteen mukaan COP-kerroin huononee, kun kaukolämmön menoveden ja geotermisenveden lämpötilaero on korkea.

Ruggero & Dumas mukaan geotermisen energian laajamittaisen käytön esteenä ovat myös useat tietoisuuteen liittyvät syyt. Heidän mukaansa geotermisen energian ajatellaan edelleen olevan käytettävissä vain alueilla, joissa on kuumia lähteitä tai lähelle maanpintaa ylettyviä kuumia pohjavesivarantoja. Tietoisuuteen liittyvistä syistä myös lupa-asiat ja geotermisen energian hyödyntämiseen tarvittava byrokratia vaihtelevat Euroopan maiden välillä suuresti ja aiheuttavat esteitä geotermisen energian yleistymiselle. (Dumas & Ruggero, 2017)

### **5.3 Geotermisten lämpöpumppujen kannattavuus**

Geotermisten lämpöpumppujen taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa erityisesti pumpun korkeat investointikustannukset, eli itse lämpöpumpun investointikustannukset sekä geotermisen kaivon investointikustannukset. Geotermisen kaivon investointikustannukset riippuvat siitä kuinka helposti saatavilla geotermistä energiaa on. Kaivon hinta on sitä pienempi mitä lähempänä maan pintaa geotermistä energiaa on saatavilla ja mitä korkeampi lämpötilaista se on. Lisäksi geotermisten lämpöpumppujen kannattavuuteen vaikuttaa lämmöstä saatava hinta eli kilpailevien lämmöntuotantomuotojen, lähinnä fossiilisten- ja biopolttoaineiden, hinta. (VP Oy, 2016)

Geotermisten lämpöpumppujen käyttökustannukset taas ovat kohtuullisen pieniä verrattuna polttamiseen perustuviin lämmöntuotantomuotoihin. Käyttökustannukset riippuvat suuresti sähkön hinnasta, joten sähkön hinnan nousulla voi olla geotermisen lämpöpumpun kannattavuutta laskeva vaikutus. (VP Oy, 2016)

Esimerkiksi Turkissa yliopiston kampuksen kaukolämpöjärjestelmää tutkineessa tutkimuksessa todettiin, että geotermisen lämpöpumpun investointikustannukset olivat öljykattilaan nähden kolminkertaiset. Toisaalta käyttökustannukset öljykattilaan nähden olivat vain kolmasosan ja 20 vuoden käyttöiällä geotermisen lämpöpumppu oli öljykattilaa kannattavampi (Yıldırım, et al., 2006). Alhaisten käyttökustannusten ansiosta geotermisillä lämpöpumpuilla voidaan siis saavuttaa taloudellisia hyötyjä. Tämä näkyy myös muissa tutkimuksissa (Kljajic, et al., 2018), (Song, et al., 2019). Edellä mainitut tutkimukset tutkivat hyvin spesifejä tilanteita eikä niistä saatuja tuloksia voida suoraan soveltaa

esimerkiksi suomen olosuhteisiin. Lähes kaikissa tutkimuksissa alueen geoterminen potentiaali on ollut suurempaa kuin Suomessa, joten suomessa jouduttaisiin poraamaan syvemmälle, mikä taas kasvattaisi investointi kustannuksia. Lisäksi myös polttoaineiden ja sähkön hinnat sekä verotus vaihtelevat maa kohtaisesti.

Toisaalta tutkimukset keskittyivät pääasiassa pieniin kaukolämpöjärjestelmiin eikä niissä huomioida lämpöpumppujen koko järjestelmän joustavuuden lisääntymisellä saavutettavaa taloudellista hyötyä. Koko kaukolämpöjärjestelmän joustavuuden lisääntyminen oli mainittu suurena hyötynä energiateollisuuden teettämän raportin haastatteluissa. Haastattelujen mukaan optimoinnista saavutetaan suurin hyöty silloin kun kaukolämpöjärjestelmän koko on suuri. (VP Oy, 2016) Myös kaukolämpöjärjestelmän muiden laitosten mitoitus ja tyyppi vaikuttavat lämpöpumpun kykyyn optimoida järjestelmää. Investoinnin kannattavuus riippuu siis suuresti paikallisista olosuhteista ja tutkimustietoa optimoinnin vaikutuksista tarvitaan lisää.

Geotermisten lämpöpumppujen kannattavuuteen vaikuttaa myös mahdolliset investointituet. Esimerkiksi työ- ja elinkeinoministeriö tarjoaa investointitukea, joka on tarkoitettu uusiutuvan energian tukemiseen sekä uuden energian demonstraatiohankkeisiin. Suomessa toteutettuihin lämpöpumppuinvestointeihin on saatu tyypillisesti tukea 10–15 % investoinnista. (VP Oy, 2016) Lisäksi johdannossa mainitut hallitusohjelman tavoitteet parantavat toteutuessaan geotermisten lämpöpumppuinvestointien kannattavuutta.

Geotermisten lämpöpumppu investointien kannattavuuteen vaikuttaa myös mahdollisuus osallistua säätösähkömarkkinoille. Lisäksi jos geotermisellä lämpöpumpulla pystytään tuottamaan kaukolämmön lisäksi kaukokylmää, parantuu investoinnin kannattavuus. (VP Oy, 2016)

## 5.4 Ympäristövaikutukset

Yksi geotermisten lämpöpumppujen etu on niiden päästöttömyys. Pumput eivät aiheuta paikallisia päästöjä käytännössä ollenkaan. Vähäpäästöisellä sähköntuotantorakenteella ne lisäävät uusiutuvaa lämmöntuotantoa kaukolämpöverkkoon. (VP Oy, 2016) Jonkin verran ympäristövaikutuksia pumpuilla kuitenkin on. Geotermistä energiaa hyödyntävien lämpöpumppujen ympäristövaikutukset koostuvat molempien pääkomponenttien eli geotermisen kaivon ja lämpöpumpun ympäristövaikutuksista.

Suurin vaikutus lämpöpumppulaitoksen ympäristövaikutuksiin on sillä, miten laitoksen kuluttama sähkö tai absorptiolämpöpumpun kuluttama lämpö on tuotettu, ja sillä kuinka suuri COP-kerroin lämpöpumppujärjestelmällä on. (VP Oy, 2016) Jos lämpöpumpun käyttämä sähkö on tuotettu päästöttömästi ei geoterminen lämpöpumppulaitoskaan

tuota juurikaan päästöjä. Lisäksi COP-kerroin vaikuttaa lämpöpumppu laitoksen päästöihin. COP-kertoimen kasvaessa uusiutuvan geotermisen energian osuus tuotetusta kaukolämmöstä kasvaa. Esimerkiksi jos ainoastaan lämpöpumpun käyttämän sähkön ilmastovaikutukset huomioidaan ja lämpöpumpun COP-kerroin on 3, sillä tuotetun lämmön hiilidioksidipäästöt ovat 1/3 käytetyn sähkön tuotannon hiilidioksidipäästöistä energiayksikköä kohden.

Lämpöpumppulaitoksen hiilidioksidipäästöt voivat kuitenkin olla jopa suuremmat kuin fossiilisilla polttoaineilla tuotetun kaukolämmön, silloin kuin käytetty sähkö on tuotettu erityisen ilmastoa kuormittavasti. Kljajic totesi, että maakaasukattilan ilmastovaikutukset olisivat 82 % pienemmät kuin geolämpöpumppujärjestelmän. Kyseinen tulos johtuu Serbian sähköntuotantorakenteesta (72 % tuotettiin hiilivoimalla). Jos sähkö olisi tuotettu ainoastaan uusiutuvista lähteistä, olisivat lämpöpumppulaitoksen ilmastovaikutukset olleet maakaasukattilaa pienemmät. (Kljajic, et al., 2018)

Useissa tutkimuksissa kaukolämpöjärjestelmän päästöjä pystyttiin pienentämään geotermisillä lämpöpumpuilla kuten (Ostergaard & Lund, 2011), (Yıldırım, et al., 2006). (Saner, et al., 2010) tutkimuksissa todettiin, että maalämpöpumppujärjestelmät Euroopassa tuottavat keskimäärin yli 50 % vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä kuin perinteiset fossiilisilla polttoaineilla toimivat lämmön tuotantojärjestelmät. Saman voidaan olettaa pätevän myös geotermiseen energiaan.

Lämpöpumpuissa myös kylmäaineet aiheuttavat negatiivisia ympäristövaikutuksia, sillä pumppujen elinkaaren aikana kylmäaineita vuotaa väkisinkin ympäristöön. 1980-luvulla käytettiin kylmäaineina pääasiassa CFC- ja HCFC-yhdisteitä. CFC- ja HCFC-yhdisteillä on kuitenkin voimakas otsonikerrosta ohentava vaikutus, ja niiden käyttöä rajoitettiin Montrealin sopimuksessa vuonna 1987 ja lopulta ne kiellettiin kokonaan. (Aittomäki, et al., 2008)

Nämä kielletyt yhdisteet korvattiin erityisesti HFC-yhdisteillä. Monet käytössä olevat HFC-yhdisteet ovat kuitenkin todella voimakkaita kasvihuonekaasuja. HFC-yhdisteillä GWP-arvo vaihtelee välillä 4–4000. Vuonna 2014 voimaan tulleen F-kaasuasetuksen myötä korkean GWP-arvon aineiden käyttöä on rajoitettu. Vuoteen 2022 mennessä uusissa laitteissa voidaan käyttää vain alle 150 GWP-arvon omaavia kylmäaineita. (Teknologiateollisuus ry, 2015) Korkealämpöpumppuihin hyvin soveltuvista kylmäaineista R134a:lla ja R245fa:lla on korkeat GWP-arvot, 1300 ja 1030. Muiden taulukon 1 kylmäaineiden GWP on alle 10. (Arpagaus, et al., 2018) (Fukuda, et al., 2014)

Geotermisen energian hyödyntämisestä syntyy jonkin verran ympäristövaikutuksia. Geotermisen vesi voi liuottaa syvältä maan sisuksista kemikaaleja kuten metaania, hiilidioksidia, ammoniakkia sekä joitakin jalometalleja. Joihinkin voimalaitoksiin onkin asennettu suodattimia ja valtaosa voimalaitoksista pumppaavat geotermisen veden takaisin maan sisään, kun energia on saatu talteen ja täten eristävät saastuttavat kemikaalit ja jalometallit ympäristöstä. (Dumas & Ruggero, 2017)

Geotermisen energia on lähes ehtymätöntä, mutta paikallista ehtymistä voi kuitenkin tapahtua. Näin voi käydä etenkin, jos geotermisen kaivo ei ole mitoitettu oikein. Esimerkiksi joissain pisimpään toimineissa voimalaitoksissa, kuten Kalifornian the Geysiresin alueen voimalaitoksissa, lämpökaivot ovat näyttäneet ehtymisen merkkejä ja niitä on elvytetty erilaisin toimenpitein. (Dumas & Ruggero, 2017) Maalämpöä lämmönlähteenä käytettäessä maaperä saattaa jäähtyä tai lämmetä jos lämpöpumppua käytetään pääasiassa lämmitykseen tai jäähdytykseen. Tämä jäähtyminen heikentää lämpöpumpun COP-kerrointa, sillä lämpöpumppu joutuu tekemään suuremman lämpötilan noston eikä pumppu enää toimi sille suunnitellulla optimaalisella alueella.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka lämpöpumpuilla pystytään hyödyntämään geotermistä energiaa, ja millaisia etuja ja haasteita geotermisten lämpöpumppujen käyttöön kaukolämmön tuotannossa liittyy. Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta, että geotermistä energiaa on ihmisten hyödynnettävissä kaikkialla Euroopassa, joskin Suomen geotermisen potentiaali on poikkeuksellisen pieni. Pienen geotermisen potentiaalin takia Suomessa joudutaan poraamaan syvemmälle tai käyttämään matalalämpötilaisempaa geotermistä energiaa. Suomessa suunnitteilla olevat geotermiset järjestelmät ovatkin EGS-järjestelmiä, joilla lämpöä voidaan tuottaa ilman maanalaista geotermisen veden varastoa. Toisaalta Suomen vakaa kallioperä helpottaa syvemmälle poraamista sekä pienentää projektin merkittävimpiä riskejä eli reiän sortumista porauksen aikana ja haitallisten maanjäristysten syntymistä hydraulisen stimuloinnin aikana. Suomessa on myös kattava kaukolämpöverkko, joka mahdollistaa geotermiselle lämmölle suuret markkinat.

Lämpöpumpuilla pystytään hyödyntämään myös matalalämpötilaisia geotermisiä varantoja. Markkinoilla on tällä hetkellä useita lämpöpumppuja, joilla pystytään tuottamaan tarpeeksi kuumaa vettä kaukolämpöverkkoon myös talviaikana. Korkea lämpöpumpuissa käytettävistä kylmäaineista suosituimpia ovat R134a, R245fa, R717, R744 ja R1234ze(E). Edellä mainituista kylmäaineista R134a ja R245fa:n GWP-arvot ovat kuitenkin niin suuria, että niiden käytöstä luovutaan lähivuosina. Näille kylmäaineille on löydetty lupaavia, joskin kalliimpia, korvaajia kuten R1234ze(E), R1234ze(Z) ja R1336mzz(Z). Suurin osa korkealämpöpumpuista on kompressorilämpöpumppuja, mutta myös absorptio- ja hybridilämpöpumpuilla pystytään tuottamaan tarpeeksi korkea-  
lämpötilaista vettä kaukolämmön tuotantoon.

Geotermiset lämpöpumput soveltuvat kaukolämmön tuotantoon ja niillä pystytään tuottamaan kaukolämpöä kilpailukykyiseen tai jopa edullisempaan hintaan kuin fossiilisilla polttoaineilla. Geotermisten lämpöpumppujen taloudellisuus perustuu niiden pieniin käyttökustannuksiin. Toisaalta geotermisten lämpöpumppujen investointikustannukset ovat polttamiseen perustuvia lämmöntuotantomuotoja huomattavasti suuremmat. Investointikustannukset kasvavat sitä mukaan mitä pienempi alueen geotermisen potentiaali on, eli mitä syvemmälle joudutaan poraamaan. Lämpöpumppulaitoksen sähköteho on myös suuri, joten lämpöpumppulaitoksen täytyy sijaita vahvassa pisteessä sähköverkkoa tai investointikustannukset kasvavat entisestään. Lämpöpumput hyödyntävät ilmaista uusiutuvaa geotermistä energiaa ja täten pienentävät kaukolämpöjärjestelmän

primäärienergian kulutusta. Vähäpäästöisellä sähköntuotantorakenteella geotermiset lämpöpumput pienentävät myös kaukolämmön tuotannon hiilidioksidipäästöjä ja lisäävät uusiutuvaa energiaa kaukolämpöverkkoon. Toisaalta jos geotermisen lämpöpumpun käyttämä sähkö on tuotettu erityisen saastuttavasti, voi geotermisen lämpöpumppulaitos olla ympäristön kannalta esimerkiksi maakaasukattilaa huonompi vaihtoehto. Geotermisen lämpöpumppulaitos ei kuitenkaan tuota paikallisia päästöjä käytännössä lainkaan.

Geotermisillä lämpöpumpuilla voidaan optimoida koko kaukolämpöjärjestelmää, koska ne käynnistyvät nopeasti ja niitä voidaan ajaa osakuormalla. Lämpöakkua, tai absorptiolämpöpumpun tapauksessa CHP-laitoksen väliottohöyryä, hyödyntämällä pystytään integroimaan lämpö- ja sähköverkkaja. Näin kaukolämmön tuotannossa pystytään hyödyntämään uusiutuvasta sähköntuotannosta aiheutuvat sähkönhinnan heilahtelut. Lämpöpumpuilla pystytään myös tuottamaan samanaikaisesti kaukolämpöä ja kaukokylmää.

Geotermisten lämpöpumppuinvestointien kannattavuus riippuu suuresti paikallisista olosuhteista, kuten alueen geotermisestä potentiaalista, kaukolämpöverkon rakenteesta ja sen lämpötilasta sekä kilpailevien polttoaineiden ja sähkön hinnasta. Tutkimustietoa geotermisten lämpöpumppujen hyödyntämisestä Suomessa ei ole, ja geotermistä energiaa koskeva kirjallisuus käsittelee pääasiassa alueita, joiden geotermisen potentiaali on Suomea suurempaa. Tutkimustietoa Suomen olosuhteissa tarvitaankin lisää.



## LÄHTEET

- Aittomäki, A. & Aalto, E. (2008). Kylmäteknikka 3. p. Suomen kylmäyhdistys.
- Arat, H. & Arslan, O. (2017). Exergoeconomic analysis of district heating system boosted by the geothermal heat pump. *Energy (Oxford)*, Vol. 119, s. 1159–1170.
- Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J., & Bertsch, S. (2018). High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy (Oxford)*, Vol. 152, s. 985–1010.
- Averfalk, H., Ingvarsson, P., Persson, U., Gong, M., & Werner, S. (2017). Large heat pumps in Swedish district heating systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 79, s. 1275–1284.
- Bertani, R., Dumas, P. & Ungemach, P. (2009) Geothermal electricity and combined heat & power, EGEC - European Geothermal Energy Council a.s.b.l.
- Bertinat, M. (1986). Fluids for high temperature heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 9(1), s. 43–50.
- Bonafin, J. (2017). Perspectives for Geothermal Energy in Europe. World Scientific.
- Çengel, Y. & Boles, M. (2011). Thermodynamics: an engineering approach (7th ed. in SI units). McGraw-Hill.
- Daisuke, W., Koichiro, I., Michiko, M. & Tomonori, Y. (2013). High Efficiency Steam Supply Heat Pump System; Steam Glow Heat Pump (SGH). Papers on Advanced Technologies for Energy Machinery and Equipment in R&D Kobe Steel Engineering Reports, No.2 Vol. 63 s. 51–56.
- De Carli, M., Galgaro, A., Pasqualetto, M. & Zarrella, A. (2014). Energetic and economic aspects of a heating and cooling district in a mild climate based on closed loop ground source heat pump. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 71(2), s. 895–904.
- Dumas, P. & Ruggero, B. (2017). Geothermal energy in Europe. Teoksessa: Perspectives for Geothermal Energy in Europe. World Scientific, s. 32–33.
- Finger, J. & Blankenship, D. (2012). Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling. U.S. Department of Energy.

- Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N. & Koyama, S. (2014). Low GWP refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for high temperature heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 40, s. 161–173.
- Grassi, W. (2017). *Heat Pumps: Fundamentals and Applications*. Springer International Publishing AG.
- Göktun, S. (1995). Selection of working fluids for high-temperature heat pumps. *Energy (Oxford)*, Vol. 20(7), s. 623–625.
- Huusko, A. (2016). *Geologian tutkimuskeskus kartoittaa suomen geoenergiapotentiaalia*. Geologian tutkimuskeskus.
- Jensen, J., Ommen, T., Markussen, W., Reinholdt, L. & Elmegaard, B. (2015). Technical and economic working domains of industrial heat pumps: Part 2 – Ammonia-water hybrid absorption-compression heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 55, s. 183–200.
- Keil, C., Plura, S., Radspieler, M. & Schweigler, C. (2008). Application of customized absorption heat pumps for utilization of low-grade heat sources. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28(16), s. 2070–2076.
- Kim, K., Seo, W., Han, J., Kwon, J., Kang, S., Ree, J., Kim, S. & Liu, K. (2020). The 2017 ML 5.4 Pohang earthquake sequence, Korea, recorded by a dense seismic network. *Tectonophysics*, Vol. 774.
- Kljajić, M., Anđelković, A., Hasik, V., Munćan, V. & Bilec, M. (2020). Shallow geothermal energy integration in district heating system: An example from Serbia. *Renewable Energy*, Vol. 147, s. 2791–2800.
- Koskelainen, L., Saarela, L. & Sipilä, K. (2006). *Kaukolämmön Käsikirja*. Helsinki: Energiateollisuus ry.
- Kukkonen, I.T. (2018) Geothermal energy from deep bedrock in Finland – Geophysical and geological constraints. *Lithosphere* 2018.
- Lambert, R. (2015). Chaudes-Aigues: France's first heating network. *District Heating News*. Haettu: 17.3.2020, Saatavissa: [www.dhcnews.net](http://www.dhcnews.net)
- Li, Y., Fu, L., Zhang, S. & Zhao, X. (2011). A new type of district heating system based on distributed absorption heat pumps. *Energy (Oxford)*, Vol. 36(7), s. 4570–4576.
- Maaskola, I. & Kataikko, M. (2014). *Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset*. Helsinki: Motiva.

NEA (2013). National Energy Authority of Iceland. Haettu: 17.4.2020, Saatavissa: [www.nea.is](http://www.nea.is)

Østergaard, P., & Lund, H. (2011). A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating. *Applied Energy*, Vol. 88(2), s. 479–487.

Pentti, M. (2020). ST1 Geolämpö. St1:n geoterminen pilottihanke Espoon Otaniemessä etenee lämpökaivojen viimeistelyvaiheeseen. Haettu: 26.4.2020, Saatavissa: <https://www.st1.fi/st1n-geoterminen-pilottihanke-espoon-otaniemessa-etenee-lampo-kaivojen-viimeistelyvaiheeseen>

Qunli, Z., Mingkai, C., Qiuyue, Z. & Hongfa, D. (2015). Research on a New District Heating Method Combined with Hot Water Driven Ground Source Absorption Heat Pump. *Energy Procedia*, Vol. 75, s. 1242–1248.

Qunli, Z., Zhang, X., Sun, D. & Wang, G. (2019). Municipal space heating using a ground source absorption heat pump driven by an urban heating system. *Geothermics*, Vol. 78, s. 224–232.

Saner, D., Juraske, R., Kübert, M., Blum, P., Hellweg, S. & Bayer, P. (2010). Is it only CO<sub>2</sub> that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14(7).

Sipilä, K. Pietiläinen, J. & Nuorikivi, A. (2016). The building level substation – the innovation of district heating system. Espoo: VTT.

Song, Z., Wang, N., You, S., Wang, Y., Zhang, H., Wei, S., Zheng, X. & Guo, J. (2019). Integration of geothermal water into secondary network by absorption-heat-pump-assisted district heating substations. *Energy and Buildings*, Vol. 202.

St1. (2016). St1 aloittaa geotermisten syvälämpökaivojen porauksen Espoon Otaniemessä. Haettu: 5.6.2020, Saatavissa: <https://www.st1.fi/st1-aloittaa-geotermisten-syvalampokaivojen-porauksen-espoon-otaniemessa>

ST1. (2020). Puhdasta geolämpöä maan syvyyksistä. Haettu: 5.6.2020, Saatavissa: <https://www.st1.fi/geolampo>

St1. (2020). St1:n mittausverkostossa havaittiin 1,67 magnitudin mikrojäristys. Haettu: 6.6.2020 Saatavissa: <https://www.st1.fi/st1n-mittausverkostossa-havaittiin-1,67-magnitudin-mikrojaristys>

Teknologiateollisuus ry. (2015). Tuotteet ympäristövaatimusten mukaisiksi: ohjeet, toimintamallit ja liittyvät kustannukset: Opas ympäristölainsäädännön viidakkoon. Helsinki: Teknologiateollisuus ry.

Teodoriu, C. & Cheuffa, C. (2011). A comprehensive review of past and present drilling methods with application to deep geothermal environment. Stanford, California: Stanford University.

Tilastokeskus. (2019). Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto. Haettu: 20.3.2020 Saatavilla: <http://www.stat.fi/til/salatuo/index.html>

Uski, M. & Piipponen, K. (2019). Selvitys geotermisen energian syväreikäporaamisesta, siihen liittyvistä ympäristönäkökohdista sekä riskienhallinnasta. Helsinki: Institute of Seismology.

Valtioneuvosto. (2019). Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 2019. Haettu 6.3.2020 Saatavilla: [valtioneuvosto.fi](http://valtioneuvosto.fi)

Vollmar, D. Wittig, V. & Bracke, R. (2015). Geothermal Drilling Best Practices: The Geothermal translation of conventional drilling recommendations-main potential challenges. GZB, International Geothermal Centre.

VP Oy. (2016). Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. Energiateollisuus.

Wu, W., You, T., Wang, B., Shi, W. & Li, X. (2014). Simulation of a combined heating, cooling and domestic hot water system based on ground source absorption heat pump. Applied Energy, Vol. 126, s. 113–122.

Yıldırım, N., Toksoy, M. & Gökçen, G. (2006). District heating system design for a university campus. Energy and Buildings, Vol. 38(9), s. 1111–1119.

Yost, K., Valentin, A. & Einstein, H. (2015). Estimating cost and time of wellbore drilling for Engineered Geothermal Systems (EGS) – Considering uncertainties. Geothermics, Vol. 53(C), s. 85–99.